

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA:

INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

INGENIEROS CIVILES

TEMA:

INFLUENCIA DEL FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA SÍSMICA (R) EN
EDIFICACIONES, UTILIZANDO LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS: DUAL LOSAS
POSTENSADAS-MUROS Y TRADICIONAL.

AUTORES:

LASSO MARTÍNEZ LUIS FIDEL

PILLAJO TELLO LUIS SEBASTIÁN

TUTOR

GUERRERO CUASAPAZ DAVID PATRICIO

Quito, enero 2020

Quito, enero de 2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Lasso Martínez Luis Fidel y Pillajo Tello Luis Sebastián, con documento de identificación N° 1719475806 y 1717193989 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación con el tema: INFLUENCIA DEL FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA SÍSMICA (R) EN EDIFICACIONES, UTILIZANDO LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS: DUAL LOSAS POSTENSADAS-MUROS Y TRADICIONAL, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIEROS CIVILES, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



LASSO MARTÍNEZ
LUIS FIDEL
C.I.: 1719475806

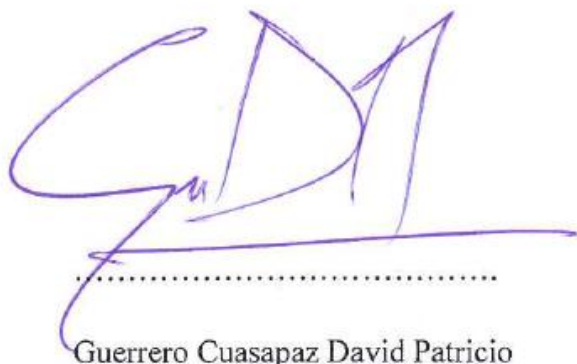


PILLAJO TELLO
LUIS SEBASTIÁN
C.I.: 1717193989

Quito, enero de 2020

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo, con el tema: INFLUENCIA DEL FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA SÍSMICA (R) EN EDIFICACIONES, UTILIZANDO LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS: DUAL LOSAS POSTENSADAS-MUROS Y TRADICIONAL, realizado por Lasso Martínez Luis Fidel con C.I.: 1719475806 y Pillajo Tello Luis Sebastián con C.I.: 1717193989, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.



Guerrero Cuasapaz David Patricio

C.I.: 1715215974

ÍNDICE

RESUMEN.	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. MATERIALES Y MÉTODOS	2
2.1 Sistema Aporticado de hormigón armado.....	2
2.2 Sistema Dual, losas postensadas y muros de corte	3
2.3 Análisis Estático Lineal	3
2.4 Análisis Estático no Lineal	4
2.5 Factor de reducción de fuerzas sísmicas	5
2.5.1 Métodos de cálculo del factor R aplicados en la investigación.....	5
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	6
3.1 Sistema tradicional aporticado.....	7
3.1.1 Análisis lineal estático	8
3.1.2 Resultados del diseño de elementos estructurales	8
3.1.3 Análisis no lineal estático	8
3.2 Sistema dual.....	9
3.2.1 Análisis estático lineal	10
3.2.2 Resultados del diseño de elementos estructurales	11
3.2.3 Análisis estático no lineal	11
3.3 Comparación entre sistemas constructivos	11
3.4 Factor de reducción de fuerzas sísmicas	13
4. CONCLUSIONES	13
REFERENCIAS.	14

INFLUENCIA DEL FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA SÍSMICA (R) EN EDIFICACIONES, UTILIZANDO LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS: DUAL LOSAS POSTENSADAS-MUROS Y TRADICIONAL

INFLUENCE OF THE SISMIC RESISTANCE REDUCTION FACTOR (R) IN BUILDINGS, USING CONSTRUCTION SYSTEMS: DUAL POSTENSED SLABS-WALL AND TRADITIONAL

Luis Pillajo-Tello 1, Luis Lasso-Martínez 2

Resumen

Se presenta un análisis de catorce modelos estructurales de los cuales siete corresponden a edificaciones de hormigón armado y siete a edificaciones con sistema dual de losas postensadas y muros de corte, modelados y analizados a partir de las herramientas computacionales ETABS-2016 y SAFE12. Se sometió a las estructuras a un análisis estático lineal considerando el cumplimiento de los controles establecidos en la norma NEC-SE-DS, 2015 garantizando un adecuado comportamiento sismo-resistente en las mismas. Además, se realizó un análisis no lineal, obteniendo la curva de capacidad de las estructuras, con el fin de determinar parámetros que permitan calcular el Factor de Reducción de Resistencia Sísmica (R) en cada modelo. Los resultados del factor R fueron obtenidos a partir de varios métodos vigentes y comparados con lo tabulado en norma, llegando a determinar que la media de los valores para el caso del sistema de pórticos de hormigón armado es 6.01, mientras que, para el caso del sistema dual de losas postensadas y muros de corte es 6.66, es decir 24.86% y 16.77% menor a lo considerado en norma, correspondientemente.

Palabras Clave: Carga reactiva, Cortante basal de fluencia, Curva de capacidad, Factor de Reducción de Resistencia Sísmica, Losas postensadas

Abstract

An analysis of fourteen structural models is presented, seven of which correspond to reinforced concrete buildings and seven to buildings with dual system of post-tensioned slabs and cutting walls, modeled and analyzed from the tools ETABS-2016 and SAFE12. The structures were subjected to a linear static analysis considering compliance with the controls set out in the NEC-SE-DS standard, 2015 ensuring adequate seismic-resistant behavior in them. In addition, a nonlinear analysis was performed, obtaining the capacity curve of the structures, in order to determine parameters that allow to calculate the Seismic Resistance Reduction Factor (R) in each model. The results of the R-factor were obtained from several methods in force and compared to the norm, going so far as to determine that the mean of the values for the case of the reinforced concrete porch system is 6.01, while, for that case of the dual system of post-tensioned slabs and cutting walls is 6.66, that is 24.86% and 16.77% lower than considered in the norm, correspondingly.

Keywords: Reactive load, Basal creep shear, Capacity curve, Seismic Resistance Reduction Factor, Post-tensioned slabs

¹ Estudiante de Ingeniería civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

² Estudiante de Ingeniería civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia: lpillajot@est.ups.edu.ec; lassom@est.ups.edu.ec

1. Introducción

El factor de reducción de las fuerzas sísmicas R , refleja las características de absorción y disipación de energía de la estructura resistente, así como el comportamiento sísmico de los diferentes tipos de estructuraciones y materiales empleados. [1] Este factor permite pasar del espectro elástico al espectro inelástico, y depende de las siguientes variables: tipo de estructura; tipo de suelo; período de vibración estructura considerado; factores de ductilidad, sobre resistencia, redundancia y amortiguamiento de una estructura en condiciones límites. [2]

El factor R tiene como función disminuir substancialmente la ordenada elástica espectral, exigiendo un diseño eficiente que permita disponer de un adecuado comportamiento inelástico durante el sismo de diseño. [2]

Los espectros de diseño definidos para la determinación del factor R se encuentran prescritos en las normativas sísmicas y tienen el 10% de probabilidad de excedencia en 50 años lo que corresponde a un período de retorno de 475 años, cuya probabilidad de ocurrencia es muy baja durante la vida útil de la estructura. Por este motivo, es que se diseña pensando que la estructura va a sufrir daño ante el espectro de diseño, pero no va colapsar, ya que la misión fundamental de todo profesional es salvar vidas. [3]

Previo al cálculo del factor R las edificaciones que forman parte de la muestra, deben tener una adecuada configuración estructural que garantice un buen comportamiento sísmico. Por lo que los criterios que se muestran a continuación son de gran importancia en este aspecto.

- Las vigas tengan daño y las columnas no. Debido a que el daño en las columnas puede afectar a la estabilidad de la estructura. Por este motivo se diseña con el criterio de columna fuerte – viga débil. [3]
- El daño se espera en lugares visibles, donde sea posible reparar y reforzar luego de un sismo severo. De ahí que no se espera daño en la unión viga – columna, sino que se

espera el daño en la viga. Por lo que se diseña con el criterio de nudo fuerte – viga débil. [3]

- El daño que se espera en los elementos estructurales, es por flexión y más no por corte. Ya que la falla por flexión es una falla dúctil y la falla por corte es una falla frágil. Por lo que la fuerza de corte de las vigas y columnas se obtiene en base a la máxima capacidad a flexión de sus elementos. [3]
- La deriva máxima de piso no sobrepase el valor permisible de 0.02 para estructuras de hormigón armado, establecido en la norma NEC-SE-DS, 2015, ya que valores muy altos, implican mucho daño en elementos no estructurales y su reparación es muy costosa. [3]

El cálculo del factor de reducción de fuerzas sísmicas permitirá un diseño más ajustado de cada estructura puesto que, si se toma el valor tabulado en la norma NEC-SE-DS, 2015 y este resulta ser mayor al calculado, se estaría induciendo un sub dimensionamiento en los elementos estructurales, ya que la fuerza de cortante basal considerada, es menor a la que requiere, mientras que si el valor tabulado es menor al calculado, se estaría induciendo un sobre dimensionamiento en los elementos estructurales, ya que la fuerza de cortante basal es mayor a la que se requiere.

2. Materiales y Métodos

Las edificaciones analizadas constan de una geometría regular en planta y elevación. Sus dimensiones en planta son de 27 metros en sentido “X” y 24.50 metros en sentido “Y”. Además, cada nivel considerado cuenta con una altura de entrepiso de 3.20 metros.

2.1. Sistema Aporticado de hormigón armado.

Se considera como un sistema tradicional a un sistema aporticado que está conformado por losas aligeradas y en general es una “estructura formada por columnas y vigas descolgadas del sistema de

piso, que resiste cargas verticales y de origen sísmico, en la cual tanto el pórtico como la conexión viga-columna son capaces de resistir tales fuerzas y está especialmente diseñado y detallado para presentar un comportamiento estructural dúctil.” [2]

La muestra de este sistema constructivo está constituida por estructuras conformadas por columnas, vigas y losas aligeradas bidireccionales, adicional a esto, su modelación considera escalera y ducto de ascensor.

En la Figura 1, se observa la configuración que considera la muestra, para la losa aligerada que es de 60-15-60 centímetros con un peralte de 27.5 centímetros.

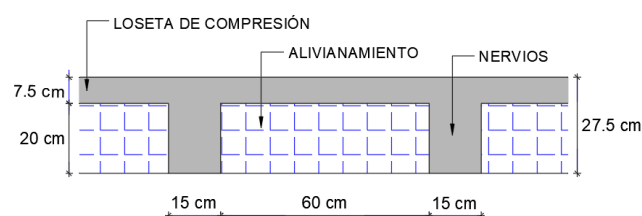


Figura 1. Configuración de losa aligerada en el sistema tradicional aporticado.

Por otra parte, el muro en el ducto de ascensor, es de espesor constante igual a 25 centímetros y una longitud de desarrollo de 5.80 metros.

2.2. Sistema Dual, losas postensadas y muros de corte.

El sistema dual considerado para la investigación comprende una edificación con losas postensadas y en general un “sistema resistente de una estructura compuesta tanto por pórticos especiales sismos resistentes y muros estructurales adecuadamente dispuestos espacialmente, diseñados todos ellos para resistir fuerzas sísmicas. Se entiende como una adecuada configuración ubicar los muros estructurales lo más simétricamente posible y que mantienen su longitud en planta en todo lo alto de la estructura. Para que la estructura se considere como un sistema dual se requiere que los muros absorban al menos el 75 % del corte basal en cada dirección.” [2]

La muestra de este sistema constructivo está constituida por estructuras conformadas por columnas, vigas y losas planas postensadas, adicional a esto su modelación considera escalera, ducto de ascensor y muros de corte perimetrales.

Los modelos consideran una losa maciza de 15 centímetros, los muros perimetrales son de 30 centímetros de espesor con un ancho que varía de (2.70 a 3.50) metros, conforme aumenta de nivel la edificación.

El proceso de diseño se divide en dos partes: la primera que consiste en la selección de dimensiones razonables de los miembros y de las fuerzas de preesfuerzo, y la segunda en el análisis de la estructura seleccionada para evaluar los esfuerzos y las resistencias resultantes; los resultados del análisis pueden o no sugerir un refinamiento de las dimensiones del miembro seleccionado y de las fuerzas de preesfuerzo [4], en la Figura 2 se puede observar la composición de una losa postensada con sus tendones no adheridos, que no son más que conductos lisos que contienen los cables de acero de alta resistencia.

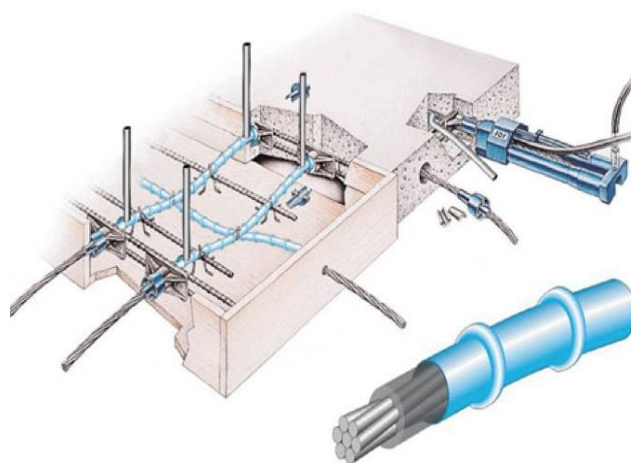


Figura 2. Tendones no adheridos en losa postensada. [5]

2.3. Análisis Estático Lineal

Este método AEL supone que la estructura responde fundamentalmente en su primer modo de vibrar. Su uso se recomienda para estructuras sencillas en las que resulten despreciables los efectos de torsión. Se puede emplear para estructuras desplantadas en terreno duro o intermedio, ya que en terreno blando los modos

superiores llegan a tener una contribución importante en la respuesta y/o es necesario considerar la interacción suelo-estructura. [6]

El software ETABS (Análisis de Edificaciones por el Método de los Elementos Finitos) se empleará en la investigación para realizar la modelación y análisis de las estructuras con su respectivo sistema constructivo (sistema aporticado y sistema dual de losas postensadas-muros).

El prediseño de los elementos estructurales es el punto de partida para la modelación, seguido de la definición de materiales, casos de carga, combinaciones de carga, etc. El objetivo es analizar la estructura, para poder verificar que se cumplan los chequeos estipulados en la normativa vigente. El diseño y optimización de las estructuras es el paso a seguir con el fin de que estas garanticen condiciones de servicio y resistencia.

El software SAFE (Análisis de Losa por el Método de los Elementos Finitos) servirá dentro de la investigación para modelar y analizar la losa de hormigón postensado; por esta razón este software resulta ser el complemento del software ETABS para cubrir el análisis completo para el caso del sistema dual.

2.4 Análisis Estático no Lineal

El AENL consiste en una sucesión de análisis lineales incrementales que en su conjunto definen el comportamiento no lineal de la estructura. La carga lateral que se aplica a la estructura se aumenta gradualmente, hasta alcanzar las demandas máximas de desplazamiento que se establecen para cada uno de los niveles del comportamiento esperado. Como este modelo analítico toma en cuenta la redistribución de fuerzas internas que se produce cuando los elementos responden inelásticamente, se considera que el AENL proporciona una medida realista del comportamiento cuando se requiere estimar las demandas en niveles de respuesta cercanos al colapso. [6]

Se considera un modelo de análisis no lineal, en el cual va cambiando la rigidez del sistema de

acuerdo al nivel de deformación de la estructura la relación entre el cortante basal y el desplazamiento lateral, tiene la forma indicada en la Figura 3, con línea continua. La pendiente en cualquier punto de la curva es la rigidez, la misma que va disminuyendo conforme se deforma la estructura. [3]

En base a la curva obtenida con análisis no lineal, se obtiene un modelo bilineal en el cual se define un punto de fluencia (y), cuyas coordenadas son (Δy) y (V_y) , que son el desplazamiento y cortante de fluencia. El criterio más utilizado es el de iguales áreas en el que se determina el punto (y) como aquel en el cual el área de la curva continúa hallada con análisis no lineal, es aproximadamente igual al área del modelo bilineal idealizado. [3]

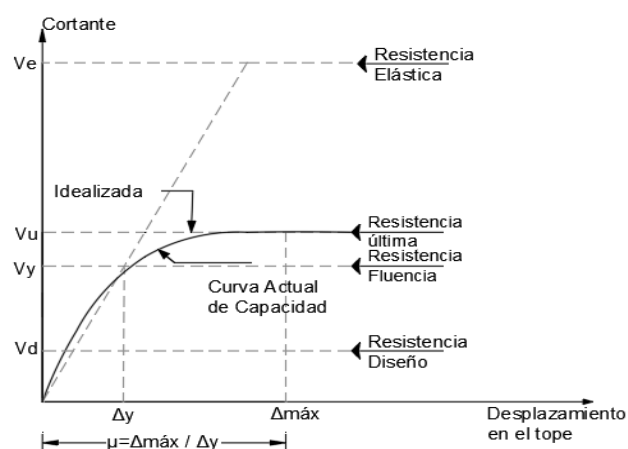


Figura 3. Curva de capacidad sísmica y factores R_u y R_Q . [7]

A partir del diseño definitivo obtenido en las estructuras previamente y del análisis anteriormente realizado mediante el método de análisis lineal estático se obtiene el AENL.

Se definen rótulas plásticas en elementos estructurales, combinaciones de carga, casos de carga y el punto de control de desplazamiento tomado en el último piso de la edificación, considerando una deriva de piso máxima de 4% [8].

El objetivo principal en este caso es obtener la curva de capacidad de la estructura y extraer parámetros fundamentales en la determinación del factor R , como por ejemplo el cortante basal

último y cortante basal de fluencia de la estructura.

Los resultados que se obtienen de un análisis no lineal (Pushover) son de gran confiabilidad, debido a que en este análisis se indica un enfoque de diseño estructural en el que toma en consideración el cumplimiento de objetivos de desempeño.[9]

2.5 Factor de reducción de fuerzas sísmicas

El factor R permite una reducción de las fuerzas sísmicas de diseño, lo que es posible siempre que las estructuras y sus conexiones se diseñen para desarrollar un mecanismo de falla previsible y con adecuada ductilidad, donde el daño se concentre en secciones especialmente detalladas para funcionar como rótulas plásticas. En el caso del método DBF (Diseño Basado en Fuerzas), se considera el factor R como parámetro constante dependiente únicamente de la tipología estructural. [2]

2.5.1 Métodos de cálculo del factor R aplicados en la investigación.

El ATC-19 (1995) considera la Ecuación 1, como forma de determinar el factor R, mediante el producto de tres factores: ductilidad, sobre resistencia y redundancia [10].

$$R = R_{\mu} * R_{\Omega} * R_R \quad (1)$$

Dónde:

R_{μ} : Factor de ductilidad

R_{Ω} : Factor de sobre resistencia

R_R : Factor de redundancia

Aguiar [11], muestra los procedimientos a seguir para determinar cada uno de estos factores. Esto se expresa a continuación.

El factor de ductilidad, basa su determinación en la Ecuación 2, donde considera la capacidad de ductilidad de la estructura y se lo obtiene a partir de la relación en el cortante basal elástico y el cortante basal último. [3]

$$R_{\mu} = \frac{V_e}{V_u} \quad (2)$$

Dónde:

V_e : Cortante basal elástico.

V_u : Cortante basal último.

El factor de sobre resistencia basa su determinación en la Ecuación 3 que define la relación entre el cortante basal último y el cortante basal de diseño de la estructura [3].

$$R_{\Omega} = \frac{V_u^*}{V_d} \quad (3)$$

Dónde:

V_u^* : Cortante basal último.

V_d : Cortante basal de diseño de la estructura.

El factor de redundancia mide la capacidad de incursionar la estructura en el rango no lineal. La capacidad de una estructura en redistribuir las cargas de los elementos con mayor solicitación a los elementos con menor solicitación. Se evalúa como la relación entre el cortante basal máximo con respecto al cortante basal cuando se forma la primera articulación plástica. [11]

Uno de los métodos más difundidos para la determinación de este factor es el de Tsopelas y Husain (2004) [12]. Y basa su determinación en la Ecuación 4.

$$R_R = rs * \left(\frac{1 - 0.12 * rv}{0.88} \right) \quad (4)$$

Dónde:

rs: índice de redundancia por resistencia.

rv: índice de redundancia por formación de rótula plásticas.

Este factor depende del índice de redundancia por resistencia, rs, el cual basa su determinación en la Ecuación 5, en donde se puede apreciar la relación entre el cortante basal último y el cortante basal de fluencia de la estructura. [11]

$$rs = \frac{V_u^*}{V_y} \quad (5)$$

Dónde:

V_u^* : Cortante basal último.

V_y : Cortante basal de fluencia de la estructura.

Adicional el factor de redundancia depende del índice de redundancia por formación de rótulas plásticas, rv , que basa su determinación en la Ecuación 6. Se determina en función del número de rótulas plásticas que se forman en un pórtico y el número de pórticos que existen en la dirección de análisis. [11]

$$rv = \sqrt{\frac{1}{n} * \frac{1}{m-1}} \quad (6)$$

Dónde:

n : Número de rótulas plásticas.

m : Número de pórticos en la dirección de análisis.

Los coeficientes 0.12 y 0.88 son de carácter estadístico y están definidos en la investigación de Tsopelas y Husain [12].

El ATC-40 (1995) considera que el factor R se determina a partir de la Ecuación 7 que expresa la relación entre la demanda de resistencia inelástica definida por la norma, como la razón entre la aceleración espectral y el peso de la estructura con el cortante basal de fluencia; y el coeficiente de resistencia de cedencia. [13]

$$R = \frac{Sa/g}{Vy/W} * \frac{1}{Co} \quad (7)$$

Dónde:

Sa : Aceleración espectral.

g : Fuerza de gravedad.

Vy : Cortante basal de fluencia de la estructura.

W : Carga reactiva.

Co : Coeficiente de resistencia de cedencia estructura.

Tabla 1: Valores para el coeficiente de resistencia de cedencia

Nº de Niveles del Edificio	Co
1	1.0
2	1.2
3	1.3
5	1.4
más de 10	1.5

Einashai y Mwafi (2002) [7], expresa un procedimiento para determinar R , a partir del factor de ductilidad y el factor de sobre resistencia. [3]

Factor de ductilidad basa su determinación en la Ecuación 8, en donde considera la capacidad de ductilidad de la estructura y se lo obtiene a partir de la relación en el cortante basal elástico y el cortante basal de fluencia. [3]

$$R_{\mu} = \frac{Ve}{Vy} \quad (8)$$

Dónde:

Ve : Cortante basal elástico.

Vy : Cortante basal de fluencia.

El factor de sobre resistencia basa su determinación en la Ecuación 9, donde define la relación entre el cortante basal de fluencia y el cortante basal de diseño de la estructura. [3]

$$R_{\Omega} = \frac{Vy}{Vd} \quad (9)$$

Dónde:

Vy : Cortante basal de fluencia.

Vd : Cortante basal de diseño de la estructura.

Además, se consideró un método alternativo, basado en la Ecuación 11, para obtener el cortante basal de diseño que se expresa en la normativa americana, ATC-40 y nacional NEC-SE-DS, 2015.

$$R = \frac{Sa * W}{Vd} \quad (11)$$

Dónde:

Sa : Aceleración espectral.

W : La carga sísmica reactiva de la estructura.

Vd : Cortante basal de diseño de la estructura.

3. Resultados y Discusión

Las edificaciones que forman parte de la muestra para la investigación fueron diseñadas considerando lo que muestra la Tabla 2 para el caso del sistema tradicional aporticado.

Tabla 2: Materiales sistema aporticado tradicional

Material	Valor
f'_c	240,00 [kg/cm ²]
f_y	4200,00 [kg/cm ²]
γ horm	2,40 [t/m ³]
γ acero	7,85 [t/m ³]
E	$13500 \cdot \sqrt{f'_c}$ [kg/cm ²]

En la Tabla 3 se expresa las características físicas de los materiales considerados en la investigación para cada sistema.

Tabla 3: Materiales sistema dual

Material	Valor
f'_c elem	280,00 [kg/cm ²]
f'_c losa	350,00 [kg/cm ²]
f_y	4200,00 [kg/cm ²]
f_{py}	19800,00 [kg/cm ²]
γ horm	2,40 [t/m ³]
γ acero	7,85 [t/m ³]

Para el diseño de losas postensadas se consideran cables de acero de preesfuerzo con las siguientes características en la Tabla 4:

Tabla 4: Características del cable de acero de preesfuerzo – Catálogo Ideal Alambrec

Diám. (mm)	Conf.	Recub.	Tracción mín. ruptura (kgf)	Área aprox. (mm ²)	Área aprox. (mm ²)
12.7	1x7	Ning.	18.73	101.4	98.7
15.2	1x7	Ning.	28.58	143.5	140
12.7	1x7	Engrasado Plastificado	19.112	101.4	98.7

Se considera torones, conformados cada uno por 7 cables de alta resistencia. El diámetro del torón utilizado es de 12.70 milímetros.

3.1 Sistema tradicional aporticado

En la Figura 4, se presenta la planta de las estructuras analizadas, correspondientes al sistema tradicional aporticado, en donde se visualiza la configuración en planta de las estructuras y la disposición de los elementos

estructurales.

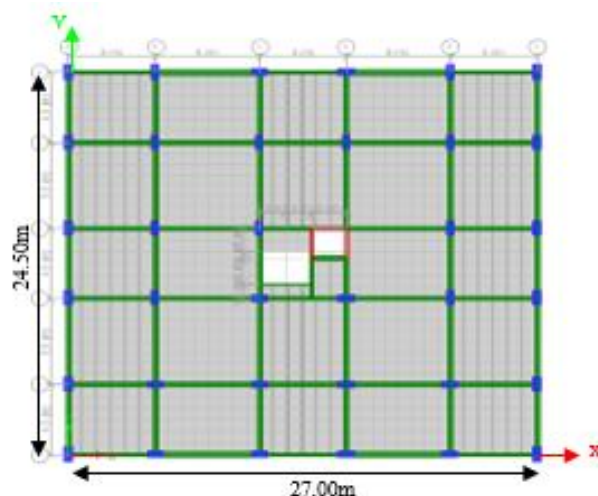


Figura 4. Planta de las edificaciones con sistema tradicional aporticado. ETABS 2016 [14]

En la Figura 5, se presenta la elevación de las estructuras analizadas correspondientes al sistema tradicional aporticado, en donde se visualiza la configuración en elevación de las estructuras y la disposición de los elementos estructurales.

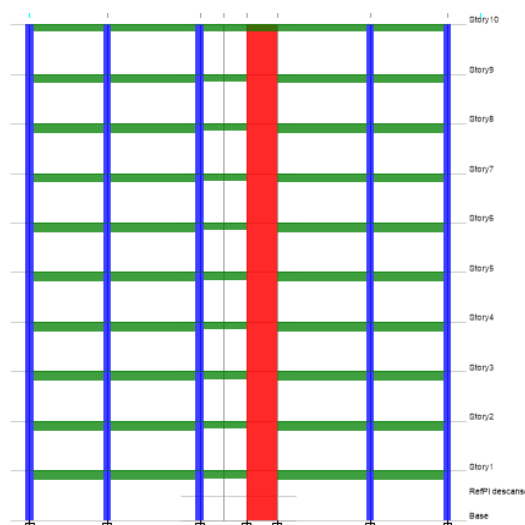


Figura 5. Elevación de las edificaciones con sistema tradicional aporticado. ETABS 2016 [14]

Las secciones de los elementos estructurales están ligadas al número de pisos que tiene la estructura, es decir, al aumento de carga aplicada sobre cada elemento. A continuación, en la Tabla 5 se muestran las secciones correspondientes a este sistema constructivo.

Tabla 5: Secciones de los elementos estructurales correspondientes al sistema tradicional aporticado

Edif	Columnas (cm)	V. Cent (cm)	V.Bord (cm)	Diafrag (cm):(m)
4P	40X85	30X60	25X65	25; 5,80
5P	40X85	35X60	25X65	25; 5,80
6P	40X85	35X60	25X65	25; 5,80
7P	40X85	35X60	25X65	25; 5,80
8P	40X85	35X60	25X65	25; 5,80
9P	45X85	35X60	25X65	25; 5,80
10P	45X90	35X60	25X65	25; 5,80

3.1.1 Análisis lineal estático

A partir del análisis lineal estático se realizan los chequeos exigidos por la norma NEC-SE-DS, 2015, estos criterios son los siguientes:

Los periodos de vibración de la estructura estimados mediante el software ETABS, 2016 no deben superar el periodo límite que corresponde a un 30% adicional al periodo calculado. Esto se visualiza en la Figura 6.

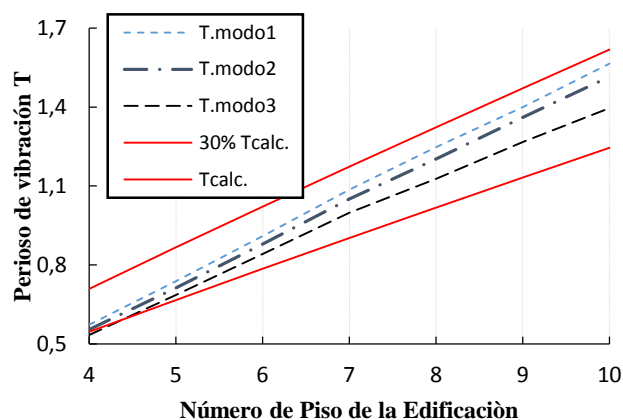


Figura 6. Periodo de Vibración vs Número de pisos. Sistema tradicional aporticado

Se puede observar que todos los valores de los periodos fundamentales de las estructuras en sus diferentes niveles, se encuentran por debajo del límite considerado y por lo tanto cumplen la condición mencionada.

Posteriormente, se comprueba que el cortante dinámico total en la base, obtenido por un método de análisis dinámico cualquiera, no sea menor que el 80% del cortante basal V obtenido por el método estático (estructuras regulares) según lo especifica la NEC-SE-DS, 2015.

La Tabla 6 es el resultado del proceso iterativo en donde se verifican los valores del cortante dinámico y estático. El análisis consiste en corregir los valores de cortante dinámico hasta que se cumpla la condición antes mencionada, en este caso los datos corresponden al edificio de 4 pisos, y fueron obtenidos a partir del software ETABS, 2016.

Tabla 6: Verificación del cortante basal estático y dinámico

Edif	Dirección	V.Din (T)	V.Est (T)	0.8V. Est (T)
4P	X	313.3	391.4	313.11
	Y	313.2	391.4	313.11

3.1.2 Resultados del diseño de elementos estructurales

En la Tabla 7 se pueden visualizar las cuantías obtenidas tras el diseño de los elementos estructurales del sistema tradicional aporticado.

Tabla 7: Cuantías de Acero de Refuerzo

Piso	Viga	Columna
4P	0.65%	1,06%
5P	0.80%	1,06%
6P	0.85%	1,06%
7P	0.91%	1,06%
8P	0.93%	1,06%
9P	0.96%	1,25%
10P	0.99%	1,05%

3.1.3 Análisis no lineal estático

La técnica pushover permite obtener la curva de capacidad de las diferentes estructuras analizadas, esta curva expresa la relación entre el cortante basal y el desplazamiento máximo lateral en el punto de control ubicado cerca del centro de rigidez, en el último piso de cada edificación. Además, la técnica pushover en este caso ayuda a

obtener parámetros involucrados en la determinación del factor de reducción de fuerzas sísmicas (R) como el cortante basal de fluencia y el cortante último de la edificación. Esto se expresa en la Figura 7.

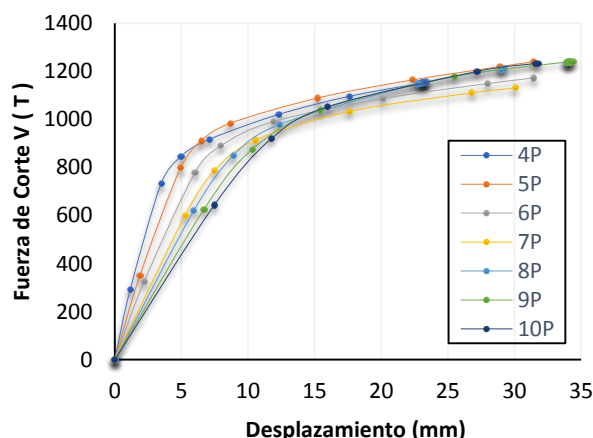


Figura 7. Curva de capacidad. Sistema tradicional aporticado

De las estructuras analizadas se obtuvo un desplazamiento lateral máximo de 207.92 milímetros correspondiente a un cortante basal último de 962.38 toneladas, específicamente en la edificación de 10 niveles con 32 metros de altura.

A continuación, se expresan tabulados los parámetros principales obtenidos de la curva que son fundamentales para la determinación del factor R. En la Tabla 8, se observan los parámetros que se extrajeron de las curvas de capacidad presentadas a través de la Figura 6, para posteriormente aplicarlos en la determinación del factor R.

Tabla 8: Parámetros extraídos de la curva de capacidad

Edif	V _y (T)	V _u (T)	S _a (g)
4P	886.07	1148.75	1.09
5P	973.87	1238.75	0.95
6P	939.32	1166.20	0.78
7P	904.94	1131.95	0.65
8P	927.39	1211.33	0.58
9P	908.80	1178.41	0.51
10P	951.65	1208.46	0.46

3.2 Sistema dual

El sistema está conformado por columnas, vigas de borde, losa plana postensada bidireccional y muros de corte perimetrales, estos últimos definen el comportamiento estructural de los edificios.

En la Figura 8, se presenta la geometría tipo de las estructuras analizadas correspondientes al sistema tradicional aporticado, en donde se visualiza de la configuración en planta de las estructuras y la disposición de los elementos estructurales.

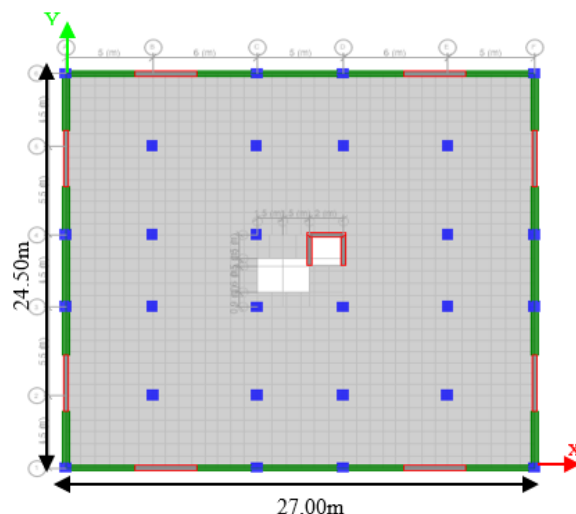


Figura 8. Planta de las edificaciones con sistema dual. ETABS 2016 [14]

En la Figura 9, se presenta la geometría tipo de las estructuras analizadas correspondientes al sistema dual.

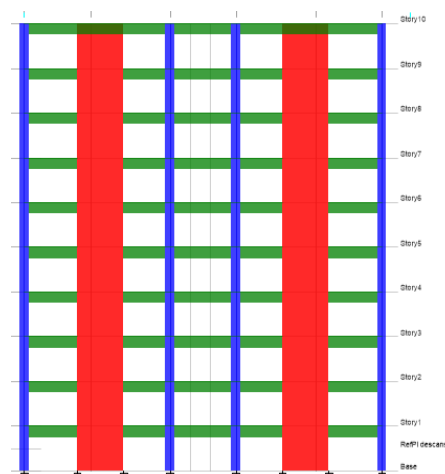


Figura 9. Elevación de las edificaciones con sistema dual. ETABS 2016 [14]

La Figura 9 muestra la configuración en elevación de las estructuras y la disposición de los elementos estructurales.

Existen varias formas para disponer el armado en las losas postensadas, posiblemente la más difundida y que se aplicó en esta investigación, es una disposición mixta. Esto se puede observar en la Figura 10.

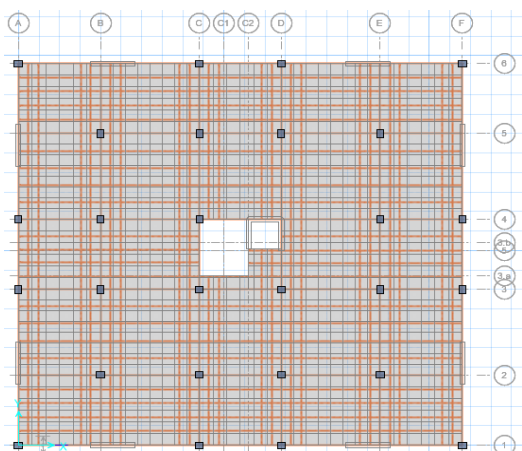


Figura 10. Planta de la losa analizada, con su respectiva distribución de acero. SAFE. [15]

Esta disposición consiste en concentrar la mitad de los tendones sobre columnas y distribuir los restantes uniformemente, con esto se garantiza dos criterios fundamentales, resistencia y facilidad constructiva, ya que satisface solicitaciones de punzonamiento y a su vez es de fácil puesta en obra. Los tendones para el postensado son de acero de alta resistencia, en la Tabla 9 se puede observar algunas de sus características.

Tabla 9: Características de cable de preesfuerzo

Torón	Dir X	Dir Y	Unidad
N° de cables	11,00	5,00	U
Diámetro	15,24	9,53	Mm
Área	1,40	0,55	cm ²
Separación	45,00	110,00	Cm
%elong mín	3,50	3,50	%

Las secciones de los elementos estructurales están ligadas al número de pisos que tiene la estructura, es decir, al aumento de carga aplicada sobre cada elemento. Además, la sección

transversal de cada elemento está condicionada a la necesidad de disminuir el periodo fundamental de la estructura para cumplir con lo establecido en norma. A continuación, en la Tabla 10 se muestran las secciones correspondientes a este sistema constructivo.

Tabla 10: Secciones de los elementos estructurales correspondientes al sistema dual.

Edif	Columnas. (cm)	Vigas (cm)	Diafragma (cm); (m)	Muro perimetral (cm);(m)
4P	40X50	25X55	30; 5,80	30; 2.70
5P	45X55	30X60	30; 5,80	30; 2.90
6P	50X60	35X65	30; 5,80	30; 3.10
7P	55X65	35X70	30; 5,80	30; 3.30
8P	55X70	40X70	30; 5,80	30; 3.50
9P	60X70	40X75	30; 5,80	30; 3.50
10P	65X70	40X80	30; 5,80	30; 3.50

3.2.1 Análisis estático lineal

En la Figura 11, se puede observar que todos los valores de los periodos fundamentales de las estructuras en sus diferentes niveles, se encuentran por debajo del límite considerado y por lo tanto cumplen la condición mencionada.

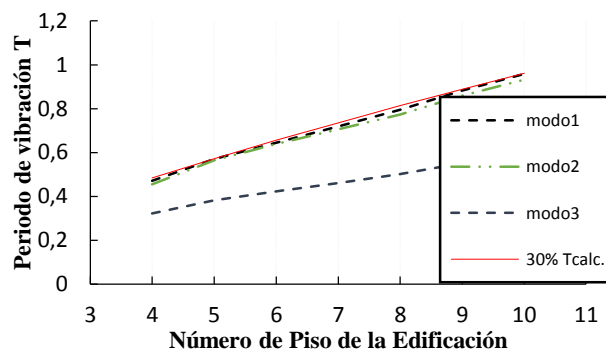


Figura 11. Periodo de Vibración vs Número de pisos. Sistema dual.

Posteriormente, se comprueba que el cortante dinámico total en el base obtenido por un método de análisis dinámico cualquiera, no sea menor que el 80% del cortante basal V obtenido por el método estático (estructuras regulares) según lo especifica la NEC-SE-DS, 2015.

La Tabla 11 es el resultado del proceso iterativo en donde se verifican los valores del

cortante dinámico y estático. El análisis consiste en corregir los valores de cortante dinámico hasta que se cumpla la condición antes mencionada, en este caso los datos corresponden al edificio de 4 pisos, y fueron obtenidos a partir del software ETABS, 2016.

Tabla 11: Verificación del cortante basal estático y dinámico

Edif	Dirección	V.Din (T)	V.Est (T)	0.8V. Est (T)
4P	X	278.09	347.61	278.09
	Y	278.15	347.61	278.09

3.2.2 Resultados del diseño de elementos estructurales

En la Tabla 12 se pueden visualizar las cuantías obtenidas tras el diseño de los elementos estructurales del sistema dual.

Tabla 12: Cuantías de acero de refuerzo

Piso	Viga	Columna	Muro corte
4P	0.52%	1,08%	0.51%
5P	0.65%	1,14%	0.71%
6P	0.73%	1,34%	0.80%
7P	0.84%	1,24%	0.84%
8P	0.84%	1,36%	0.844%
9P	0.85%	1,33%	0.81%
10P	0.85%	1,45%	0.76%

3.2.3 Análisis estático no lineal

En la Figura 12 se presentan las curvas de capacidad correspondientes a las edificaciones analizadas con sistema dual.

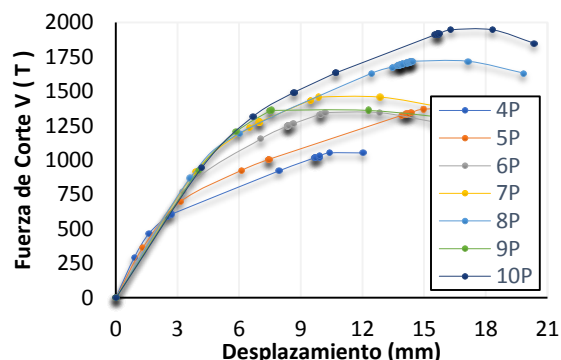


Figura 12. Curva de capacidad. Sistema dual

De las estructuras analizadas el desplazamiento lateral máximo es de 137.21 milímetros correspondiente a un cortante basal último de 1647.12 toneladas, específicamente en la edificación de 9 niveles con 28.8 metros de altura.

En la Tabla 13 se observan los parámetros que se extrajeron de las curvas de capacidad para posteriormente aplicarlos en la determinación del factor R.

Tabla 13: Parámetros extraídos de la curva de capacidad

Edif	Vy (T)	Vu (T)	Sa (g)
4P	553.14	1043.89	1.09
5P	756.02	1367.69	1.09
6P	886.34	1343.19	1.07
7P	1058.25	1456.81	0.98
8P	1114.54	1716.47	0.91
9P	1046.24	1361.09	0.83
10P	1287.85	1945.93	0.77

3.3 Comparación entre sistemas constructivos

Los valores de los periodos fundamentales de vibración de las estructuras analizadas para el caso del sistema tradicional (aporticado) son mayores en un 30.77% a los valores obtenidos en el sistema dual.

En la Tabla 14 y Tabla 15 se pueden observar las cargas sísmicas reactivas correspondientes a cada sistema constructivo, adicional se detallan los parámetros involucrados en su determinación. Estos son: la aceleración espectral, Sa, el coeficiente de cortante basal, C y el cortante basal en cada estructura, V.

Tabla 14: Cargas sísmicas reactivas en los edificios correspondientes al sistema tradicional aporticado

Edif	C (adim)	V (T)	W (T)
4P	0.149	391.62	2628.32
5P	0.146	482.52	3304.91
6P	0.118	469.70	3980.48
7P	0.099	460.92	4655.79
8P	0.086	464.56	5401.88
9P	0.076	474.49	6243.31
10P	0.069	487.26	7061.75

Tabla 15: Cargas sísmicas reactivas en los edificios correspondientes al sistema dual

Edif	C (adim)	V (T)	W (T)
4P	0.149	347.85	2334.59
5P	0.149	450.85	3025.82
6P	0.149	561.19	3766.40
7P	0.147	664.05	4517.38
8P	0.134	707.40	5279.12
9P	0.123	742.57	6037.14
10P	0.112	763.38	6815.86

A su vez en la Figura 13, se verifica que existe una disminución en el peso con el sistema dual, específicamente en promedio de 214 toneladas se reduce la carga sísmica reactiva en este sistema.

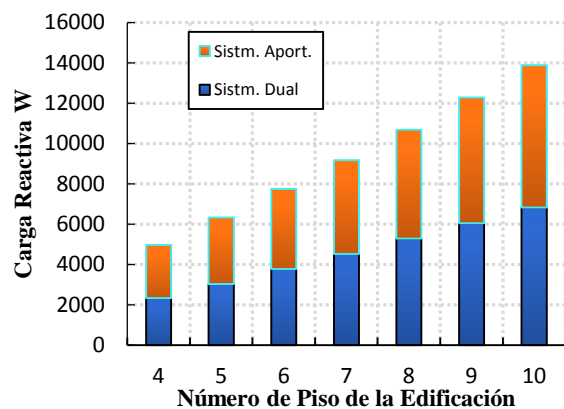


Figura 13. Carga reactiva vs Número de pisos.

Las derivas de piso máximas para cada edificio son notoriamente mayores en el sistema tradicional con respecto a las obtenidas en el sistema dual, esto es debido a que las estructuras conformadas con muros de corte son más rígidas y por lo tanto están más restringidas a desplazamientos laterales.

En la Figura 14, se puede visualizar lo descrito anteriormente en donde se verifica adicionalmente que para todos los casos las derivas son menores al límite exigido por la norma NEC-SE-DS. 2015 que corresponde al 2% para estructuras de hormigón armado.

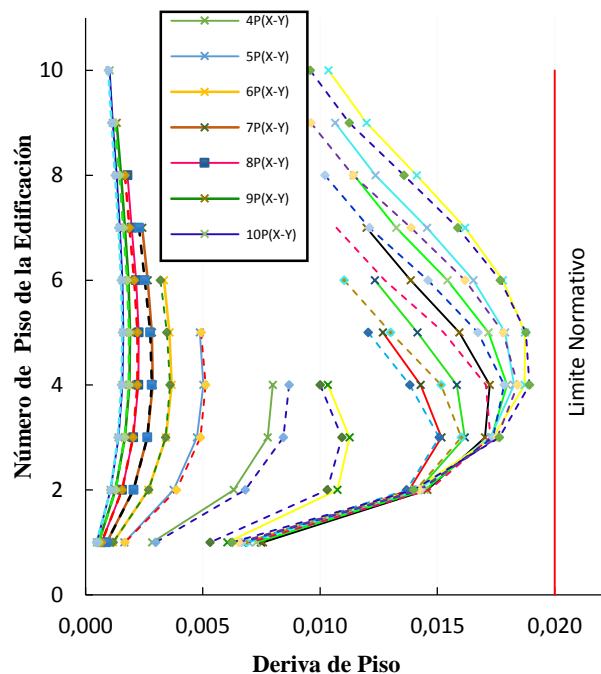


Figura 14. Número de pisos vs Derivas en pórticos.

En la Figura 15, se presentan los cortantes de piso de cada estructura correspondiente al sistema aportado tradicional, en donde se puede observar que el cortante de piso máximo es de 487.26 toneladas. correspondiente al edificio de 10 niveles de 32 metros de altura.

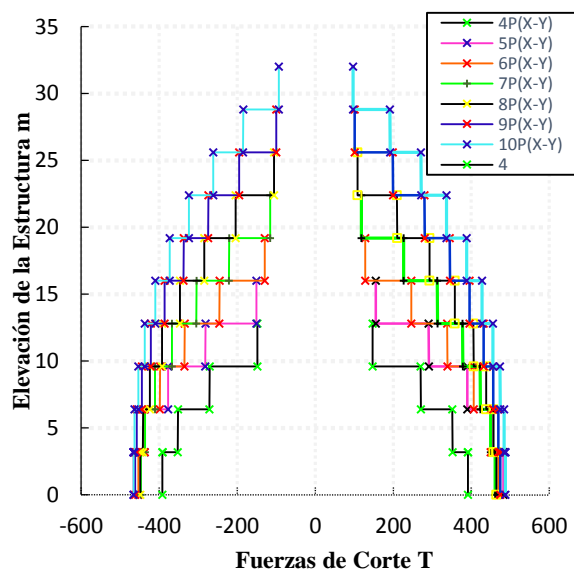


Figura 15. Elevación vs Fuerzas de Corte por piso. Sistema aportado.

En la Figura 16, se presentan los cortantes de piso de cada estructura, que son mayores para el caso del sistema dual llegando hasta 763.38 toneladas. correspondiente al edificio de 10 niveles de 32 metros de altura.

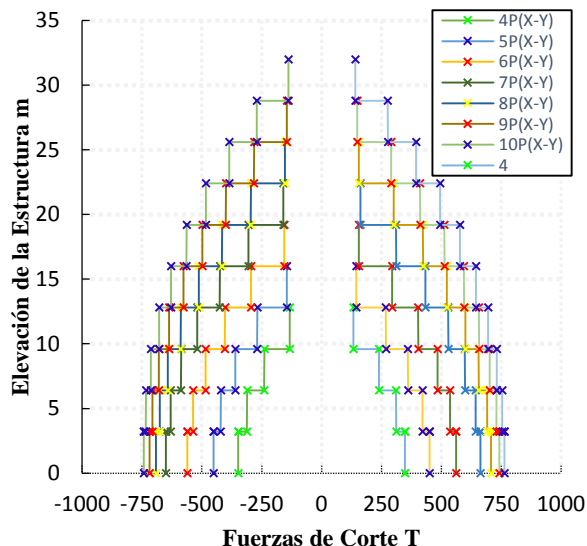


Figura 16. Elevación vs Fuerzas de Corte por piso. Sistema dual

3.4 Factor de reducción de fuerzas sísmicas

En el caso del sistema tradicional el 100% de los valores del factor R para los diferentes métodos utilizados, se encuentran por debajo del valor tabulado en la norma $R=8$. Esto se puede visualizar en la Figura 17.

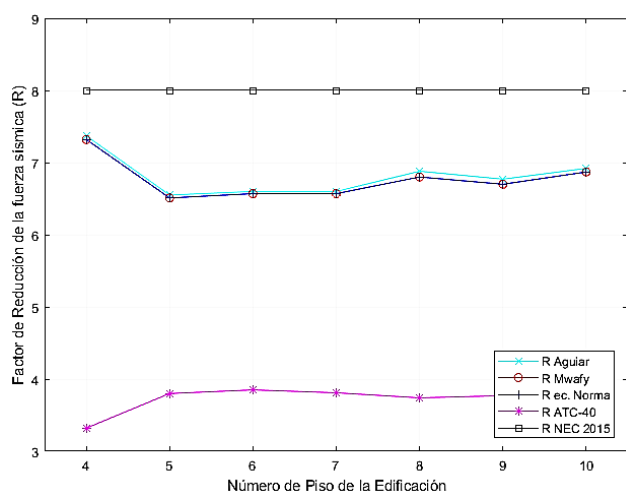


Figura 17. Factor de reducción de fuerzas sísmicas R vs Número de pisos. Sistema tradicional aporticado

Para el sistema dual el 93% de los valores del factor R para los diferentes métodos utilizados, se encuentran por debajo del valor tabulado en la norma $R=8$. Esto se puede visualizar en la Figura 18.

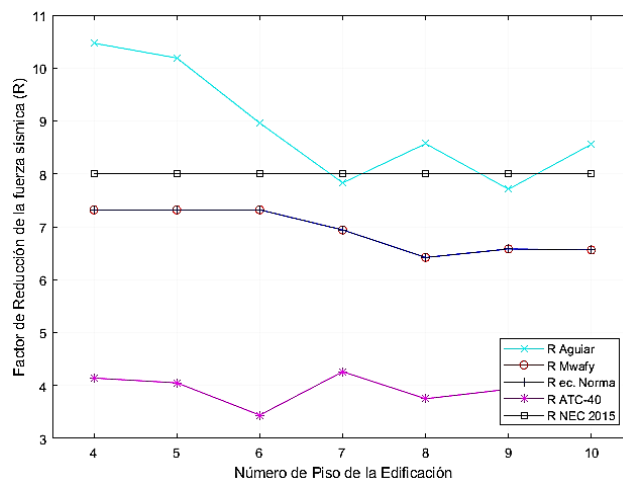


Figura 18. Factor de reducción de fuerzas sísmicas R vs Número de pisos. Sistema dual

4. Conclusiones

Los valores obtenidos del factor de reducción de fuerzas sísmicas (R) varían en función del método aplicado y directamente de los factores que estos involucran en su determinación. En cada uno de los casos el comportamiento del factor R con respecto a la altura de la edificación no es lineal y depende fundamentalmente de la aceleración espectral y del peso de cada edificación.

En la Tabla 16 y Tabla 17 se puede observar los valores del Factor de Reducción de Resistencia Sísmica, R , calculados en esta investigación a partir de los diferentes métodos expuestos anteriormente. Los resultados son válidos para estructuras de hormigón armado correspondientes a un sistema tradicional aporticado y a un sistema dual de losas postensadas-muros de corte respectivamente, en edificaciones de 4 a 10 pisos de altura para ambos casos.

Adicional, se determinó la media de estos valores a partir de dos enfoques: enfoque del

método de cálculo del factor R, \ddot{Y} y enfoque respecto a la altura de la edificación, \ddot{Y} .

Tabla 16: Valores del Factor de Reducción de Resistencia Sísmica, R. para el sistema tradicional aporticado.

PISO	AGUIAR	MWAFY	EC. NORMA	ATC-40	\ddot{Y}	NEC 2015
4	7.37	7.32	7.32	3.32	6.33	8.00
5	6.55	6.51	6.51	3.80	5.84	8.00
6	6.60	6.57	6.57	3.85	5.89	8.00
7	6.60	6.57	6.57	3.81	5.89	8.00
8	6.88	6.80	6.80	3.74	6.05	8.00
9	6.77	6.70	6.70	3.77	5.98	8.00
10	6.92	6.87	6.87	3.71	6.09	8.00
\ddot{X}	6.81	6.76	6.76	3.71	6.01	

Tabla 17: Valores del Factor de Reducción de Resistencia Sísmica, R. para el dual de losas postensadas-muros de corte

PISO	AGUIAR	MWAFY	EC. NORMA	ATC-40	\ddot{Y}	NEC 2015
4	10.47	7.32	7.32	4.14	7.31	8.00
5	10.19	7.32	7.32	4.05	7.22	8.00
6	8.96	7.32	7.32	3.44	6.76	8.00
7	7.83	6.94	6.94	4.26	6.49	8.00
8	8.57	6.42	6.42	3.75	6.29	8.00
9	7.71	6.58	6.58	3.93	6.20	8.00
10	8.56	6.56	6.56	3.69	6.34	8.00
\ddot{X}	8.90	6.92	6.92	3.90	6.66	

En base a lo anterior y para cualquiera de los dos enfoques expuestos, se determina una media global de la muestra, de donde se obtuvo que para el caso del sistema tradicional aporticado el valor del factor de reducción de fuerzas sísmicas R es igual a 6.01, y de igual manera para el caso del sistema dual el valor de este factor es de 6.66. Estos valores resultan ser menores a lo considerado en la NEC, 2015 en un 24.86% y 16.77% correspondientemente.

Adicional, los modelos analizados de edificaciones con sistema dual resultan ser en promedio 5.29 % más livianas que los correspondientes al sistema tradicional, esto es aproximadamente 214 toneladas de diferencia., por lo que se ratifican las ventajas previamente definidas debido al postensado de las losas.

Referencias

- [1] Norma NCh 433.Of 96, (1996). “Diseño sísmico de edificios”, Instituto de Normalización. INN-Chile, Santiago.
- [2] Norma NEC-SE-DS, 2015. “Peligro Sísmico”, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Quito
- [3] R. Aguiar, “Factor de reducción de las fuerzas sísmicas en edificios de hormigón armado sin muros de corte” A.H. Barbat, pp. 9-11, 2007.
- [4] *Diseño de losas postensadas*, Instituto Mexicano A. C., Limusa, AZ, 1989
- [5] *Ideal Alambrec Beakaert*, Catálogo de Torones, Quito, 2019. Recuperado de: https://construex.com.ec/exhibidores/ideal_alambrec_bekaert/producto/torones
- [6] *Diseño de obras civiles*, Comisión federal de electricidad., México 2008.
- [7] Elnashai A., and Mwafy A., “Overstrength and force reduction factors of multistory reinforced-concrete buildings”, Struct. Design Tall Building, pp, 11, 2002.
- [8] Building Seismic Safety Council BSSC (2000), “Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 356”, Washington.
- [9] D. Guerrero, “Análisis técnico y económico del diseño por desempeño de edificios con estructura de acero utilizando arriostramientos concéntricos” ResearchGate, pp.58, 2019.
- [10] Norma ATC-19, 1996. “Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings”. California Seismic Safety Commission. Vol 1 E.E.U.U.
- [11] R. Aguiar, “Análisis del Factor de reducción de las fuerzas sísmicas” A.H. Barbat, pp. 3-13, 2006.
- [12] Tsopelas P., and Husain M., “Measures of Structural Redundancy in Reinforced Concrete Buildings II: Redundancy Response Modification Factor RR”, Journal of Structural Engineering, pp. 6, 2004.

- [13] Norma ATC-40, 1995. "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings". California Seismic Safety Commission. Vol 1 E.E.U.U.
- [14] ETABS, M; e. (2016) *Software especializado en elementos finitos*. Obtenido de <http://www.csi.espana.com>
- [15] SAFE, M; e. (2012). *Software especializado en elementos finitos*. Obtenido de <http://www.csi.espana.com>